

■ 論 文 ■

**정체상황에서의 강제 차로변경행태 분석
(도로공사로 인한 차로폐쇄 시뮬레이션 기반)**

Mandatory Lane-changing Behavior under the Congested Work Zone Traffic Operation

강 경 표

(한국교통연구원 첨단교통기술연구실 책임연구원)

이 광 훈

(서울시정개발연구원 도시교통연구부 선임연구위원)

목 차

- I. 서론
 - 1. 연구 배경
 - 2. 연구 목적
 - II. 도로공사 시 교통운영
 - 1. 차로폐쇄를 유발하는 도로공사 형태
 - 2. 도로공사 시 합류제어 전략
 - III. 도로공사 교통 시뮬레이션 보정
 - 1. 현장자료 수집
 - 2. 시뮬레이션 보정
 - IV. 강제 차로변경 모형추정 및 분석
 - 1. 로지스틱 회귀모형
 - 2. 모형추정 및 분석
 - V. 결론 : 모형추정의 한계와 의의
- 부록
참고문헌

Key Words : 강제차로변경행태, 도로공사, 합류제어, 시뮬레이션 보정, 로지스틱 회귀모형

Mandatory lane-changing behavior, Work zone, Merge controls, Simulation calibration, Logistic regression model

요 약

교통상황에 따른 차로변경관련 현장자료의 부재와 더불어 기존 시뮬레이션 프로그램의 반영여부에 대한 연구가 없는 상태에서 특정 교통 및 도로조건하에서의 차로변경행태를 무시한 시뮬레이션 자료나 연구결과는 실제 상황과 비교하여 많은 차이를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 시뮬레이션 자료를 기반으로 강제 차로변경행태모형을 추정 및 분석하여 기존 시뮬레이션 툴의 반영여부를 알아본다. 이를 위하여, 대상 시뮬레이션 네트워크는 도로공사 시 차로폐쇄로 인한 강제 차로변경상황을 고려하였으며, 실제 교통자료를 이용한 미시적인 시뮬레이션 보정작업을 수행하였다. 또한, 실제 도로공사 시 교통류 처리를 위한 교통운영기법 중 하나인 합류제어전략에 따른 강제 차로변경행태를 대상 시뮬레이션 툴에 반영하였다. 이를 통하여 얻어진 교통자료를 가지고 로지스틱 회귀모형을 이용한 강제 차로변경행태를 추정하였다. 모형의 분석결과, 미시적 보정작업을 거친 시뮬레이션 툴은 도로공사 시 차로변경행태를 합류제어전략에 따라 적절하게 반영하는 것으로 판단된다. 하지만, 주의할 점은 본 연구에서 추정된 강제 차로변경행태모형은 추후 실제 교통상황과 차로변경행태간 상호관계를 규명하고 신뢰성 있는 모형개발에 필요한 기초자료에 해당한다. 따라서, 추정된 모형의 파라미터 값들은 상대적인 개념으로서 모형자체의 적용성을 논할 단계가 아님을 주지할 필요가 있다.

Due partly to lack of actual lane-changing data and partly to few studies on simulation functions to consider the lane-changing behavior, it may result in significant difference between simulation-based and real conditions. The objectives of this study are to estimate the set of mandatory lane-changing models and to analyze their features, depending on the merge control strategies under the lane-closed work zone operations. To achieve them, first, the elaborated calibration is required to simulate the mandatory lane-changing behaviors with the actual field data. Second, one can estimate their models with the logistic regression models, to obtain traffic variables as well as the lane-changing frequencies under the various levels of work zone traffic conditions. As a result, one can state that the well-calibrated simulation has the potential to properly reflect the target mandatory lane-changing behaviors. In addition, it should be mentioned that the set of proposed models is not practicable but preliminary result needed to identify the relations between the actual traffic conditions and lane-changing maneuvers and to develop their practical models for the actual applications.

본 연구는 건설교통부 교통체계효율화사업의 연구비 지원(u-Transportation 기반기술개발)에 의해 수행되었습니다. 연구의 내용은 저자의 의견으로 향후 변경될 수 있습니다.

1. 서론

1. 연구배경

교통류의 차로변경행태(lane-changing behavior) 분석은 지난 몇 십년간 담보상태에 있다고 해도 과언이 아니다. 가장 큰 이유는 실제 자료수집 및 방법이 어렵고, 차로변경을 일으키는 요인으로서 교통 및 도로조건들이 다양해짐에 따라 관련 분석모형개발이 어렵기 때문이다. 현재 사용 중인 교통관련 미시적인 시뮬레이션 프로그램은 기존의 차로변경 모형을 자체적으로 단순히 수정 또는 보완해서 사용하고 있는 실정이다.

나아가, 교통상황에 따른 차로변경행태와 관련하여 기존 시뮬레이션 프로그램의 반영여부에 대한 연구가 없는 상태에서 특정 교통상황에서의 차로변경행태를 무시한 시뮬레이션 자료나 분석결과를 실제 상황과 비교하여 많은 차이를 초래할 수 있다. 특히, 특정 교통조건하에서 차로변경 또는 운전자간 추종(car-following) 행태 사이의 상호관계에 대한 구체적인 이해와 지식이 없이는 교통운영자들이 사고와 같은 비반복 정체유발 시 교통정체패턴의 공간적 진이(spatial evolution)와 차로변경행태를 추정 또는 예측하기가 불가능하며, 특정 제어전략을 효과적으로 적용하기가 어렵다.

2. 연구 목적

본 연구에서는 언급한 특정 교통 및 도로조건 중 진입연결로 및 도로공사 시 상류부 또는 합류 구간에서 빈번하게 발생하고 있는 강제 합류행위(mandatory merging actions)를 유발하는 교통상황에서의 차로변경행태(mandatory lane-changing behaviors)를 대상으로 하고 있다. 이런 유사한 조건을 설정하기 위하여, 도로공사로 인한 차로폐쇄 때문에 발생하는 정체상황에서의 차로변경행태를 분석하고자 한다. 이를 위하여 실제 도로공사 중 차로폐쇄로 인한 정체상황 시 수집한 현장자료를 바탕으로 미시적 보정작업을 거친 시뮬레이션 프로그램인 CORSIM의 차로변경자료를 가지고 시간당 차로변경차량의 퍼센트를 추정하는 모형을 만들었다. 따라서, 본 연구의 목적은, 모형분석을 바탕으로 정체상황에서 해당 교통운영기법 중 하나인 합류제어전략에 따른 CORSIM의 강제 차로변경행태 반영여부의 적정성을 알아보고, 이를 위해 미시적인 시뮬

레이션 보정작업의 필요성을 살펴보기로 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 연구대상으로 삼고 있는 교통상황을 이해하기 위하여 II장에서는 차로가 폐쇄되는 도로공사 구성형태의 기본정의와 상류부로부터 접근하는 교통류를 효과적으로 처리하기 위한 기본적인 교통운영전략에 대해서 살펴본다. III장에서는 이러한 교통상황과 운영전략을 최대한 구현하기 위하여 시뮬레이션 프로그램인 CORSIM을 이용한 미시적인 보정작업을 설명한다. IV장에서는 II장에서 언급한 가장 보편적인 교통운영전략에 따른 차로변경행태를 분석하기 위하여 III장에서 구현한 시뮬레이션 자료를 가지고 강제 차로변경행태 모형을 추정하고 분석한다. 마지막으로, V장에서는 모형의 수정 및 보완작업을 논하고 시뮬레이션 기반의 강제 차로변경행태 분석모형의 한계와 적정성을 논한다.

II. 도로공사 시 교통운영

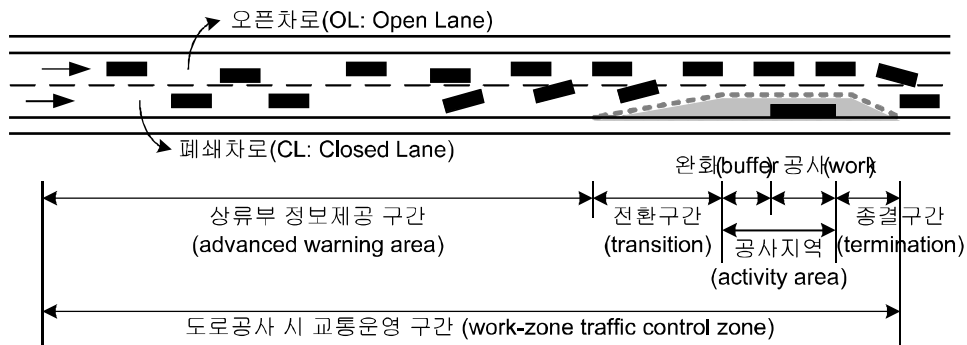
1. 차로폐쇄를 유발하는 도로공사 형태

도로의 유지보수 및 건설 등으로 도로구간에서 발생하는 공사항위는 교통지체 및 안전에 악영향을 미치는 주요한 원인이다. 왜냐하면 도로공사 구간의 차로폐쇄로 인한 교통운영은 용량감소뿐만 아니라, 복잡한 차로변경 및 합류행태를 유발하게 되고, 상류부의 과도한 대기행렬 및 높은 속도변동이 나타나게 되어 추돌 및 충돌사고로 이어지기 때문이다(〈그림 1〉 참조).

이러한 복잡한 교통상황을 처리하기 위하여 〈그림 2〉에서 보는 바와 같이 도로공사가 진행되는 차로를 포함



〈그림 1〉 도로공사 시 차로폐쇄로 인한 교통정체



〈그림 2〉 도로공사 시 교통운영을 위한 개략도

한 상류 및 하류부 구간에 대한 도로공사 시 교통운영구간(예: work-zone traffic control zone)을 설정하여 다양한 교통운영 및 제어전략을 수행하고 있다.

2. 도로공사 시 합류제어 전략

앞에서도 언급했듯이, 도로를 점유하는 대부분의 공사 시에는 차로가 폐쇄되어 해당구간의 용량이 감소되기 때문에 가급적 비침투 시간동안에 공사를 수행할 필요가 있지만, 그럼에도 불구하고 정체로 인한 교통흐름이 끊기고 사고가 빈번하게 발생하는 주된 이유는, 차로폐쇄로 인한 도로공사 시 용량감소의 영향이 상류부에 미치는 구간길이(예: Work-zone traffic control zone) 및 감소된 통과교통량(예: work-zone through-puts)을 예측하기가 매우 힘들기 때문이다(〈그림 2〉 참조).

한편, 이러한 영향을 완화하기 위하여 선진국(예: 미국)에서는 다양한 교통운영기법과 제어전략들을 개발 및 현장에 적용하고 있다. 그 대표적인 예로서, 속도제어(speed control) 및 합류제어(merge control)를 들 수

있는데, 전자는 상류부의 접근교통량의 속도변동을 최소화하여 용량감소로 인한 충격파의 영향을 줄이기 위함이며, 후자는 하류부의 차로폐쇄로 인하여 불가피하게 발생하는 합류 및 차로변경 등의 복잡한 운전행태를 교통상황에 따라 효과적인 차로운영을 통하여 공사구간을 통과하도록 하는 것이다.

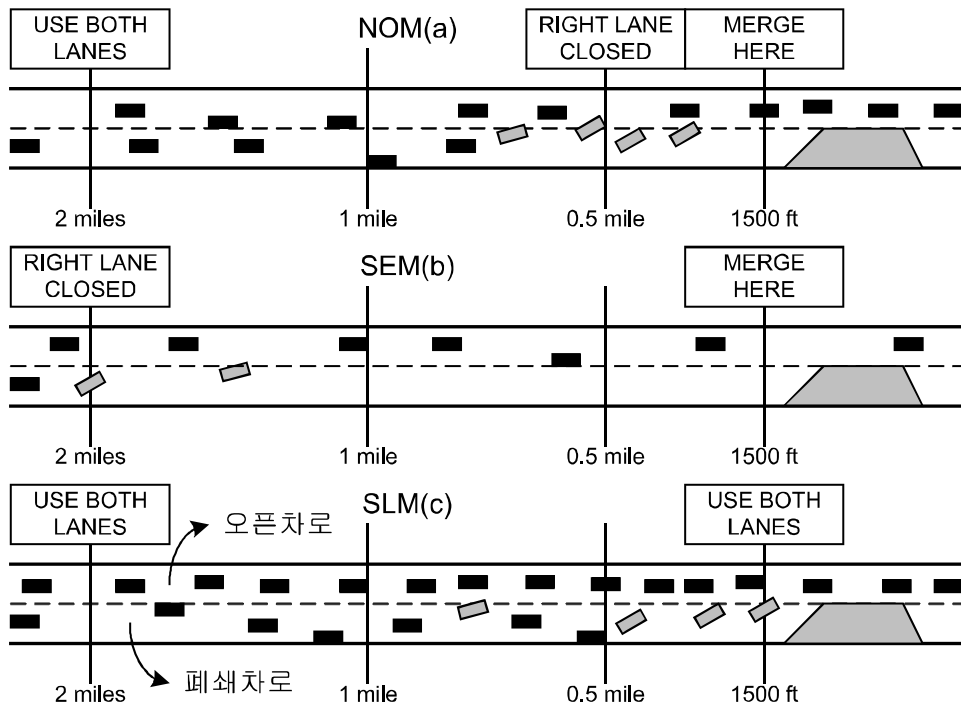
본 연구의 주요 관심사는 차로변경행태 관련이므로 여기서는 교통운영기법 중 합류제어전략에 따른 차로변경 및 교통상황에 대하여 간단하게 살펴보기로 한다.

〈표 1〉과 〈그림 3〉은 정적인(static) 합류제어로서 비합류(예: NOM-no merge), 조기합류(예: SEM-static early merge), 후기합류(예: SLM-static late merge)에 대한 시스템 운영특징과 운전자행태에 대하여 요약한 내용이다.

간단히 설명하여, NOM(No merge)은 현재 가장 보편적으로 사용하고 있는 방법으로서 NDOR(Nebraska Dept. of Road, McCoy 등, 1999)합류제어라고도 불리우며, 보통 0.5mile(≈0.8km) 지점(예: "오른쪽 차로 폐쇄" - "RIGHT LANE CLOSED")까지는 모든 차로이용

〈표 1〉 합류제어 전략에 따른 운영특징 및 운전자 행태

합류제어	시스템 운영특징 및 운전자 행태
NOM 그림 2-3(a)	<ul style="list-style-type: none"> • 형태와 기능측면에서 SEM과 SLM의 중간 형태임 • 명확한 합류특징(예: 조기합류 또는 후기합류)은 없으며, 운전자의 평상시의 합류지점(0.5mile)을 이용함
SEM 그림 2-3(b)	<ul style="list-style-type: none"> • 상류부에서의 합류유도를 통하여 차로변경과 합류로 인한 상충 및 속도변동을 최소화함 • 운전자들은 상류부 2miles(3.2km)에서 합류를 시작하여 1mile(1.6km)전에 오픈차로로 차로변경을 완료해야 함 • 합류지점에서의 고속차량간 상충을 방지함 • 교통량이 증가할수록 그 기능 및 효과는 감소함
SLM 그림 2-3(c)	<ul style="list-style-type: none"> • 합류지점까지 모든 차로의 이용을 극대화하여 통과차량을 증가시킴 • 운전자들은 합류지점까지 모든 차로의 이용이 가능함 • 제한된 합류구간에서의 차로변경행위가 제약을 받음 • 오픈차로는 폐쇄차로 차량의 합류를 위한 충분한 공간확보가 필수적임 • 오픈 및 폐쇄차로간 차로변경 및 합류로 인한 통과교통량 증가 • 교통량이 적정수준(최대 통과교통량, max. throughputs)을 넘으면 기능감소



〈그림 3〉 합류제어 전략에 따른 시스템 운영

이 가능하다(예: “모든 차로 주행가능” - “USE BOTH LANES”). SEM(McCoy 등 1999, McCoy와 Pesti 2001)은 교통량이 적은 경우, 고속차량이 합류지점에서의 상충가능성을 방지하기 위하여 상류부(예: 2miles ≈ 3.2km)에서 미리 합류를 유도하는 것이고, 반면에 SLM(McCoy 등 1999, McCoy와 Pesti 2001, Beacher 등 2005)은 합류지점까지 차량이 모든 차로이용이 가능하도록 하여 가능한 차로효용(lane utility)을 극대화함으로써 통과교통량을 증가시키기 위함이다. 주의해야 점은, 모든 합류제어는 전환구간(transition) 전방에 반드시 오픈차로로 합류 및 차로변경을 알리는 표지(예: “합류지점” - “MERGE HERE” / “TAKE YOUR TURN”)를 설치해야 한다. 이는 기존 MUTCD (Manual Uniform on Traffic Control Devices, FHWA 1995)의 지침을 따르고 있음을 말해준다.

III. 도로공사 교통 시뮬레이션 보정

1. 현장자료 수집

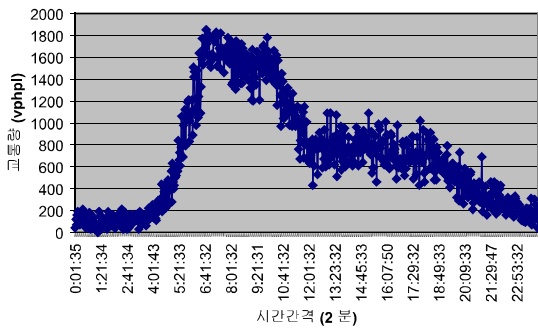
시뮬레이션 보정에 필요한 현장자료는 도로공사 시 합

류제어전략에 따른 효과를 평가하기 위한 실제 프로젝트 (Chang과 Kang, 2005)수행을 통하여 얻었다. 대상도로공사구간의 합류제어는 NOM(No Merge) 제어전략이다(〈표 1〉 및 〈그림 3〉 참조). 이를 통하여 얻은 현장 자료는 교통량, 속도, 점유율로서 상류지점(1.0mile ≈ 1.6km), 중간지점(0.5mile ≈ 0.8km), 합류지점 (1500ft ≈ 450m)에 설치한 센서(RTMS: Remote Traffic Microwave Sensor)를 통하여 단위시간(30초)마다 자료를 얻게 된다.

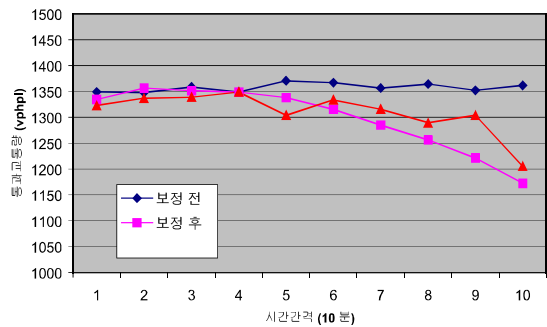
2. 시뮬레이션 보정

미시적인 시뮬레이션 보정작업의 필요한 이유는 차로 변경이라는 복잡한 운전행태를 반영한 교통상황을 최대한 고려하기 위함이다. 물론 연구대상으로 삼고 있는 특정 교통상황(도로공사)하의 실제 자료를 가지고 보정을 해야 하며, 특히 본 연구에서는 보정되는 시간간격을 짧게(예: 10분) 설정하여 미시적인 보정작업을 수행하였다.

대상 시뮬레이션 도로구간을 보정하기 위하여 사용된 현장 교통자료로서 교통량, 차량구분(예: 승용차 및 중차량), 속도 등을 5분 시간간격마다 3개 지점(예: 상류/중



〈그림 4〉 NOM 제어하의 통과교통량 패턴



〈그림 5〉 합류지점(1500ft)에서의 시뮬레이션 보정 결과 비교

〈표 2〉 도로공사 교통시뮬레이션 보정 결과 비교

교통조건	실제 값	시뮬레이션 결과		
		보정 전	보정 후	
상류부 교통량 (2 lanes)	1875 vph	1890 vph	1893 vph	
중차량 비율	19 %	19 %	19 %	
중간지점	평균속도	31.0 mph	50.4 mph	34.3 mph
	교통량	1362 vphpl	1406 vphpl	1398 vphpl
합류지점	평균속도	24.0 mph	46.0 mph	22.6 mph
	교통량	1340 vphpl	1380 vphpl	1328 vphpl

간/합류지점)에서 얻은 자료를 사용하였다. 〈그림 4〉는 하루 동안의 실제 오픈차로를 통과하는 교통량 분포로서, 실제 차로당 최대 통과교통량(max. throughputs)은 1800vphpl 안팎으로서 도로공사로 인한 용량이 감소됨을 보여주고 있다.

보정에 사용된 주요 시뮬레이션(CORSIM) 파라미터로서 rubberneck factor, car-following sensitivity multiplier, designed free flow speed 등이며, 이에 대한 설명은 다음과 같다.

- rubberneck factor[0, 99]: 차로상에서 발생하는 돌발상황(도로공사, 사고)에 대한 운전자 반응정도(퍼센트)를 고려하기 위한 것으로서 높은 값(default=0)을 가질수록 반응정도가 심하여 용량이 감소된다.
- car-following sensitivity multiplier[1, 1000]: 돌발상황에서 주행하는 앞차에 대한 민감도를 차량간 간격 등으로 나타내는 것으로서 높은 값(default=100)을 가질수록 민감도가 커진다.
- designed free flow speed: 동일 구간임에도 불구하고 강제차로변경 지점에 가까울수록 접근속도가 낮아지기 때문에 해당 구간의 제한속도를 규제할 필요가 있다.

〈표 2〉와 〈그림 5〉는 정상교통과 도로공사시 교통운영 상태를 미시적으로 보정한 결과이다. 특히, 〈그림 5〉은 합류지점에서 보정된 시뮬레이션 네트워크가 실제 도로공사시 교통상황을 적절하게 반영하고 있음을 알 수 있다.

IV. 강제 차로변경행태 모형 추정 및 분석

Ⅲ장의 미시적인 보정작업을 통해 구축된 도로공사시 정체상황 시뮬레이션 네트워크에서 다양한 교통상황에 따른 강제 차로변경행태관련 교통자료(예: 차로별 교통량, 속도 및 상대속도, 차로변경 갯수 등)를 얻을 수 있게 된다. 고려한 교통상황은 II장에서 설명한 차로제어전략인 조기합류(early merge)과 후기합류(late merge)을 적용하였다(〈표 1〉과 〈그림 3〉 참조).

1. 로지스틱 회귀모형

교통정체상황에서 차로폐쇄로 인한 강제 차로변경행태를 분석하기 위하여 본 연구에서는 단위시간마다 차로를 변경하는 차량 퍼센트와 교통변수간 관계를 추정하기로 한다. 이를 위하여, θ 를 시간간격 5분 동안의 차로변경을 수행한 차량 퍼센트라고 표시한다. 하지만, 실제 이 값은 [0, 1]안에 존재하게 되어 선형회귀에서의 가정인 정규분포하에서 확률범위 $[-\infty, \infty]$ 와는 맞지 않는다.

따라서, 본 연구에서는 일반적인 회귀모형(generalized linear models)의 하나인 로지스틱 회귀모형(logistic regression model)(Chang and Kao 1991, Kang and Chang 2006)을 이용하여 강제 차로변경행태를 추정하기로 한다. 모형에 대하여 간단히 설명하면, 먼저 n_i

을 시간간격 k 동안 구간 i 에서 관측된 차량갯수이고, 이 중 차로를 변경하는 차량갯수를 y_i 라고 정한다. 그러면, 변수의 집합(예: $y_1/n_1, \dots, y_n/n_N$)은 차로를 변경하는 차량갯수의 양(fraction)으로서 다음과 같이 변환된다.

$$Y_i(k) = \ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = b_{i,0} + b_{i,1} \cdot u_i(k) + b_{i,2} \cdot sr_i(k) \quad (1)$$

여기서, Y_i 은 차로상에서 확률 $P_i (= y_i/n_i)$ 의 로지스틱 변환함수이고, u_i 와 sr_i 은 각각 현재차로에서의 평균 속도(average speed)와 인접 차로간 상대속도비율(speed ratio)(예: $sr_i^o = u_i^o/u_i^c$ 와 $sr_i^c = u_i^c/u_i^o$)를 나타낸다. 그리고, $b_{i,0}, b_{i,1}, b_{i,2}$ 은 최대우도(maximum likelihood) 방법에 의하여 추정되는 모형 파라미터 값들이다.

더불어, 식(1)에서 선택된 속도관련 변수는 기존 차로변경행태 연구(Chang and Kao 1991, Kang and Chang 2006)에서도 언급하고 있듯이, 교통특성에 상관없이 운전자의 차로변경행태에 공통적으로 영향을 미치는 요소들이다. 또한 실제뿐만 아니라 시뮬레이션 상에서 수집자료의 한계와 교통변수간의 상관관계 때문에 사용한 변수의 수는 제한적이다.

2. 모형추정 및 분석

서론에서 밝혔듯이, 도로공사와 같은 비반복 교통정

제하의 차로변경행태에 대한 현장자료 및 관련 연구가 거의 전무하기 때문에, 본 연구에서는 세밀한 보정작업을 거친 시뮬레이션을 기반으로 한 실험 데이터를 이용하여 합류 및 차로변경 행태를 분석하고 및 이에 대한 기존 시뮬레이션 프로그램의 강제 차로변경행태 반영여부를 알아보고자 한다.

주의할 점은 비록 기존 시뮬레이션 프로그램은 자체적으로 내재된 추종모형(car-following models)을 기반으로 적절하게 보완 및 수정작업을 거쳐 사용하고 있으나, 본 연구에서 다루고자 하는 강제 차로변경행위는 현재 운영 중인 제어전략(예: 합류제어)과 처해진 교통상황(예: 평균속도 및 상대속도비율)에 따라 다를 것으로 예상된다. 본 연구에서는 이러한 특정 정체상황에서의 강제 차로변경행태를 다양한 교통조건하의 시뮬레이션 자료를 가지고 분석가능한지를 알아보고자 한다.

이를 위하여, 차로변경 및 합류행태가 전방에 설치한 첫 번째 제어정보(warning sign)의 위치(예: 2 miles \approx 3.2km)에서 뚜렷하게 차이가 나는 조기합류 및 후기합류제어 전략(〈표 1〉 및 〈그림 3〉 참조)에 대한 차로변경행태를 분석하였으며, 〈표 3〉은 위 식(1)을 기반으로 추정된 모형결과를 요약한 것이다.

상류부 첫 번째 합류제어 정보가 설치된 위치를 기준으로 운전자들이 이곳을 통과한 후(AFTER)와 전(BEFORE)에 보이는 강제 차로변경행태를 각〈표 3〉의 상단과 하단에 각각 제시되었으며, 이에 대한 분석결과 는 다음과 같다.

〈표 3〉 강제로 차로 변경하는 차량들의 확률모형

상류부	합류제어 (현재차로) (OL)-오픈차로 / (CL)-폐쇄차로		C(intercept) $b_{i,0}$	Average speed $b_{i,1}$	Speed ratio $b_{i,2}$
AFTER	SLM (OL)	Parameter	0.1291	-0.0337	-0.1224
		t-value	5.40	-108.80	-3.43
	SLM (CL)	Parameter	-0.3627	-0.0351	0.9584
		t-value	-18.57	-161.68	71.65
	SEM (OL)	Parameter	-1.6899	-0.0374	-0.1411
		t-value	-7.87	-11.40	-5.13
	SEM (CL)	Parameter	-1.2689	-0.2218	12.2391
		t-value	-26.34	-272.89	278.23
BEFORE	SLM (OL)	Parameter	-4.0480	0.1513	-6.5714
		t-value	-10.46	54.73	-15.30
	SLM (CL)	Parameter	-5.5731	0.1549	-5.2542
		t-value	-13.61	60.44	-14.62
	SEM (OL)	Parameter	2.5437	0.0269	-5.5446
		t-value	62.75	33.46	-65.11
	SEM (CL)	Parameter	-4.7729	0.0212	2.2813
		t-value	-67.23	31.73	68.05

1) 통과 후의 차로변경행태 (AFTER)

운전자는 해당 합류제어 정보표지판을 통과하게 되면 (AFTER) 하류부에 도로공사를 인지하게 됨으로써, 운전자의 평균주행속도는 희망속도보다 낮게 되면서 강제 차로변경의 영향을 받게 된다. 따라서,

- 후기합류(SLM) 제어하에서는 운전자들은 합류지점(1500ft~450m)까지 거의 양차로(오픈 및 폐쇄차로)를 균일하게 사용하게 되므로 차로변경과 합류의 영향은 하류부 합류지점을 제외하고는 균일하게 나타났다.
- 오픈차로(OL: Open Lane)상에 있는 운전자는 평균속도와 상대속도비율이 인접해 있는 폐쇄차로(CL: Closed Lane)보다 작지 않는 한 폐쇄차로의 차로변경을 꺼려한다.
- 따라서, 오픈차로에서는 평균속도 및 상대속도비율과 차로변경확률 사이에는 비슷한 음성적 관계(negative relation)을 보여주고 있다.
- 그러나, 폐쇄차로에서는 상대속도비율과는 양성적 관계(positive relation, 예: 0.9584)를 유지하는데, 주된 이유는 폐쇄차로상에서 대부분의 차로변경행위는 하류부의 합류지점에서 발생하며, 이 때 오픈차로보다는 높은 상대속도비율 값을 보여주고 있다.
- 반대로, 폐쇄차로에서 평균속도와는 음성적 관계(예: -0.0351)를 보이고 있는데, 왜냐하면 오픈차로의 합류횟수가 증가할수록 폐쇄차로에서는 합류로 인한 상충 때문에 평균속도가 감소되기 때문이다.
- 조기합류(SEM) 제어하에서는 대부분의 차량이 오픈차로로의 합류 및 차로변경을 시도하기 때문에, 차로변경과 합류의 영향이 폐쇄차로보다는 오픈차로에서가 상대적으로 크게 나타난다.
- 오픈차로에서는 조기합류(SLM)에서와 마찬가지로 평균속도 및 상대속도비율과 차로변경확률 사이에서 음성적 관계를 비슷하게 보이고 있다.
- 그러나, 폐쇄차로에서의 강제 차로변경행태를 살펴보면, 평균속도와는 음성적 관계(예: -0.2218, t -value=-272.89)와 상대속도비율과의 양성적 관계(예: 12.2391, t -value=278.23)가 후기합류(SLM) 제어하의 대응값(예: -0.0351, t -value: -161.68과 0.9584, t -value=71.65)보다 크게 나타나고 있다.

- 주된 이유로서, 조기합류(SEM)하의 폐쇄차로에서 대부분의 차로변경과 합류행위는 오픈차로보다 높은 상대속도비율 값을 가지고 있기 때문이다.

2) 통과 전의 차로변경행태 (BEFORE)

운전자가 해당 합류제어 정보표지판을 통과하기 전에는 자유 교통류상태를 의미하며, 대부분의 운전자들은 그들의 희망속도(desired speed)에 가까운 높은 평균속도로 주행할 수 있다. 따라서,

- 강제 차로변경보다는 비강제 차로변경행태(non-mandatory lane-changing behavior)에 가까운 차로주행행태를 보인다고 할 수 있다.
- 운전자들은 현 차로상에서의 평균속도와 상대속도비율이 차로변경이나 합류를 하고자 하는 차로(target lane)에서 보다 작을 경우, 기꺼이 차로변경을 시도한다.
- 따라서, 높은 희망속도(desired speed)를 유지하기 위해서는 고속의 차량들은 상대적으로 낮은 앞차량 및 인접차량들을 적극적으로 추월하고자 하는 경향을 보인다.
- 후기합류(SLM)의 경우, 양차로(오픈차로 및 폐쇄차로) 모두 비슷하게 차로변경확률과 평균속도 사이에는 양성적 관계(예: 오픈차로=0.1513, 폐쇄차로=0.1548)와 상대속도비율 사이에는 음성적 관계(예: 오픈차로=-6.5714, 폐쇄차로=-5.2545)가 나타나고 있다.
- 이러한 관계는 비강제(non-mandatory) 차로변경행태관련 기존 연구결과(예: Chang and Kao 1991, Kang and Chang 2006)와 비슷하다.
- 조기합류(SEM) 제어하에서는 평균속도가 차로변경행태에 미치는 영향(예: 오픈차로=0.0269, t -value=33.46, 폐쇄차로=0.0212, t -value=31.73)은 후기합류(SLM)에서보다 약하다(예: 오픈차로=0.1513, t -value=54.73, 폐쇄차로=0.1548, t -value=60.44).
- 주된 이유는, 비록 상류부(2miles~3.2km)이전 구간이라 하더라도 정체상황에서는 폐쇄차로로의 조기합류의 영향이 상류부 끝단까지 미칠 수 있기 때문이다. 결과적으로, 상대적으로 교통량이 적은 폐쇄차로에서는 평균속도와 차로변경확률 사이에는 양성적 관계(예: 2.1838)가 존재한다.

V. 결론 : 모형추정의 한계 및 의의

차로변경모형(lane-changing models)은 사고와 같은 비반복 정체유발시 교통정체패턴의 공간적 전이(spatial evolution)와 차로변경행태를 추정 또는 예측하는데 매우 중요한 교통류 분석모형이다. 하지만, 차로변경행태관련 자료수집이 어려운 상태에서, 강제 차로변경과 같은 특정 교통상황에 따른 차로변경행태 연구는 현실적으로 힘든 게 사실이다. 이에 대한 대체수단으로서, 해당 교통분석에 적합한 미시적인 시뮬레이션 프로그램을 사용하고 있으나, 반영하고자 하는 교통상황과 이에 따른 미시적인 교통류 행태분석에는 사용한 사례가 드물다.

이에 대한 기초연구로서, 본 연구에서는 기존 시뮬레이션 프로그램기반의 교통자료를 이용한 강제 차로변경행태를 살펴보았다. 이를 위하여 실제 차로폐쇄를 유발하는 도로공사 시 시간대별 현장자료를 이용한 미시적인 보정단계를 거친 시뮬레이션 네트워크를 설계하였다. 더불어, 도로공사 시 정체상황에서 기존 합류제어 전략(예: 조기 및 후기 합류제어)에 따른 운전자의 차로변경행태를 교통 시뮬레이션상에 반영하여 강제 차로변경행태 모형을 추정하였다.

주지할 점은, 본 연구에서 추정된 모형은 추후 특정 교통조건하에 실제 교통상황과 차로변경행태간 상호관계 규명을 위하여 신뢰성 있는 모형개발에 필요한 기초자료(preliminary results)에 해당된다. 따라서, 추정된 모형의 파라메타 값들은 상대적인 개념으로서 의미가 있는 것이지, 모형자체의 적용성을 논하기에는 이른 단계이다. 마지막으로, 이러한 기초자료는 관련 ITS 기술(예: 가변정보표지판)을 적용하여 상류부에서 접근해 오는 운전자들에게 차로변경 및 합류관련 정보제공 및 위치설정을 적절하게 설계하는데 사용될 수 있다.

[부록]

본문에서 제시한 θ 의 특성에 근거하여, θ 와 분수(fraction)집합 사이의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_i = P_i = \frac{y_i}{n_i} = \sum_{j=1}^k x_{ij}\beta_j + e_i \quad (2)$$

여기서 n_i 은 주어진 차로에 대하여 i 번째 시간간격동안

안 관측된 차량의 댓수이고, y_i 은 그 중 차로변경 댓수를 말하며, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 은 모형의 파라메터, x_{ij} 은 독립변수를 나타낸다.

여기서 주의할 점은 (식 1)처럼 보통 사용되고 있는 선형모형을 적용할 경우에는 오차항목이 일반적으로 정규분포를 따르고 있다고 가정하기 때문에 확률 P_i 는 $[-\infty, +\infty]$ 범위에 있게 되며, 이는 확률법칙과 맞지 않기 때문에 결과적으로 편이된 추정결과를 낳게 된다.

그러므로, 이런 선형 모형구조를 변환시키기 위하여 일반화된 이항모형(generalized binary model)을 사용하는데, 예를 들어 P_i 에 대하여 단위간격 $[0, 1]$ 을 실제 범위인 $[-\infty, +\infty]$ 상에 매치시키는 것이다. 이를 위해, 로지스틱 변환으로 식(2)와 같은 로지스틱 회귀모형으로 바꿀 수 있다.

$$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = Y_i = \sum_{j=1}^P x_{ij}b_j + e_i \quad (3)$$

여기서, x_{ij} 은 독립변수이고 b_j 은 모형의 파라메터이다. 따라서, 차로당 n_i 가 주어진다면 i 번째 시간간격동안 y_i 만큼의 차로변경 댓수를 갖게 되는 우도(likelihood) 함수는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$L(P_i, b_i) = \prod_{i=1}^N [(P_i)^{y_i} \cdot (1-P_i)^{n_i - y_i}] \quad (4)$$

$L(P_i, b_i)$ 와 같은 우도함수는 추정의 편리성 때문에 다음과 같은 로그변환(log transformation)이 필요하다. 이 경우, 모형의 파라메터는 표준 최대우도(maximum likelihood estimation) 방법에 의하여 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N [y_i \ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) + n_i \ln(1-P_i)] \\ & = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P y_i x_{ij} b_j - \left[\sum_{i=1}^N n_i \ln(1 + \exp\sum_{j=1}^P x_{ij} b_j) \right] \quad (5) \end{aligned}$$

참고문헌

1. Beacher, A. G., Fontaine, M. D., and Garber, N. J. (2005), "Field Evaluation of the Late Merge Work Zone Traffic Control", TRB 84th

Annual Meeting, CD-ROM.

2. Beacher, A. G., Fontaine, M. D., and Garber, N. J. (2005), "Guidelines for Using Late Merge Work Zone Traffic Control: Results of a Simulation-based Study", TRB 84th Annual Meeting, CD-ROM.
3. Chang, G. L. and Kang, K. P. (2005), "Evaluation of Intelligent Transportation System Deployments for Work Zone Operations. Report MD-05-SP", Department of Civil Engineering, University of Maryland(UMCP), Sponsored by Maryland State Highway Administration.
4. Chang, G. L. and Kao, Y. M. (1991), "An Empirical Investigation of Macroscopic Lane-changing Characteristics on Uncongested Multilane Freeway", Transportation Research Part A, pp.375~389.
5. Federal Highway Administration (FHWA) (1995), "Part IV of Manual on Uniform Traffic Control Devices (MUTCD)", Revision 4, Department of Transportation. U.S.
6. Kang, K. P. and Chang, G. L. (2006), "Observations of Macroscopic Non-mandatory Lane-changing Behaviors on the Capital Beltway", presented in the 85th TRB Annual Meeting, Washington D.C. USA
7. McCoy, P. T., Pesti, G., and Byrd, P. S. (1999), "ALTERNATIVE DRIVER INFORMATION TO ALLEVIATE WORK-ZONE RELATED DELAYS", Research Project SPR-PL-1(35)P513, Department of Civil Engineering College of Engineering and Technology, sponsored by Nebraska Department of Roads.
8. McCoy, P. T. and Pesti, G. (2001), "Dynamic Late Merge-Control Concept for Work Zones on Rural Interstate Highways", In Transportation Research Record 1745, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.20~26.

✉ 주 작성자 : 강경표
 ✉ 교신저자 : 강경표
 ✉ 논문투고일 : 2007. 11. 10
 ✉ 논문심사일 : 2008. 1. 14 (1차)
 2008. 1. 28 (2차)
 ✉ 심사판정일 : 2008. 1. 28
 ✉ 반론접수기한 : 2008. 6. 30